

硬 X 線光電子分光による窒化ガリウム系電子デバイスの 表面状態解析 (II) Analysis on Surface Condition for GaN-based Electron Device by HAXPES (II)

舘野 泰範^a, 駒谷 務^b, 荒谷 毅^a, 河内 剛志^a, 倉知 俊介^b, 斎藤 吉広^a
Yasunori Tateno^a, Tsutomu Komatani^b, Takeshi Araya^a, Tsuyoshi Kouchi^a,
Shunsuke Kurachi^b, and Yoshihiro Saito^a

^a住友電気工業(株), ^b住友電工デバイス・イノベーション(株)

^aSumitomo Electric Industries, Ltd., ^bSumitomo Electric Device Innovations, Inc.

電子デバイス用の n 型窒化ガリウム(n-GaN)と窒化シリコン(SiN_x)保護膜の界面状態に関し、硬 X 線光電子分光(HAXPES)による分析を行った。試料には、O₂ プラズマ処理した n-GaN 表面に SiN 膜を堆積したもの、及び、更に高温アニールを施したものの、の 2 種類を用意した。また、チャージアップ抑制のため、試料表面に薄い AuPd を蒸着している。データ解析では、AuPd の Au4f スペクトルを用いてチャージアップ補正を行った上で、試料間で Ga2p スペクトルの比較を行った。その結果、アニールにより SiN_x/GaN 界面には金属状 Ga が生成している可能性が示唆された。

キーワード： GaN、SiN_x、高温アニール、硬 X 線光電子分光

背景と研究目的：

GaN 系の高電子移動度電界効果トランジスタ(HEMT)は、高出力増幅素子として携帯電話基地局や衛星通信用途などへの応用が拡大しているが、材料固有の現象の理解がまだ不十分である。特に、半導体と絶縁保護膜の界面状態は、デバイス特性に大きな影響を与える要素である。具体的には、界面に存在するトラップに電子が捕獲され、寄生的な空乏層が拡大することで、HEMT の電流チャネル狭窄と出力低下をもたらすことが知られている[1] [2]。このため、界面トラップの低減は、工業的に重要な課題となっている。

我々は、2010 年 A 期に引き続き、硬 X 線光電子分光(HAXPES)による GaN/SiN_x 界面状態分析を行った。今回は、特にチャージアップ補正法について詳しく検討した上で、アニールの有無による界面状態の変化について調査を行った。

実験：

図 1 に試料断面の構造模式図を示す。試料#1 は、キャリア濃度 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ の n-GaN 表面を O₂ プラズマ処理した後、プラズマ CVD で厚み約 4nm の SiN_x 膜を堆積したものである。試料#2 では、更に高温でのアニールを追加している。アニール条件は、温度 >600°C、還元雰囲気中 (プロセス時間 ~ 約 15 分) とした。なお、チャージアップ抑制のため、試料表面には厚み 3 nm または 6 nm の AuPd 合金を蒸着した。

HAXPES 測定は、SPring-8 の BL46XU にて実施した。励起 X 線エネルギーは 7.9keV、光電子取出し角(TOA)は 80° と 30° の 2 水準で行った。光電子検出には半球型電子アナライザを用い、50meV ステップでスイープを行った。測定は、Ga2p などの他、チャージアップ補正を目的として AuPd 中の Au4f についても行った。

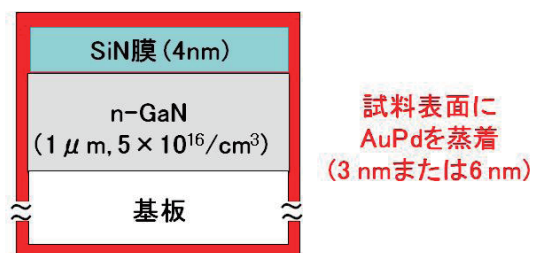


図 1. 分析用試料の断面構造

結果および考察：

(1)チャージアップ補正

まず、AuPd の測定結果について詳しく検討した。本研究の AuPd 合金は Pd 濃度が 40% と大きく、単体の Au に比べて化学シフトを持っている可能性があった。そこで、図 2 のように Au と AuPd が同電位となるような厚膜の積層試料を別途作製し、通常の光電子分光装置で Au4f の測定を行っている。その結果、AuPd は Au に対し、低エネルギー側に 0.394 eV の化学シフトを持つことが分かった。即ち、Au=84 eV として、AuPd=83.606 eV になる。

図 3 は、HAXPES 試料に蒸着した AuPd の Au4f スペクトル実測例である。比較のため、Au 標準試料のスペクトル、及び、上記の AuPd =83.606 eV のピーク位置も併記してある。厚み 3 nm の AuPd では、本来のピーク位置である 83.606 eV から、約 0.7 eV 高エネルギー側にシフトしている。一方、厚み 6 nm では、シフトは 0.1eV 程度であった。なお、シフト量は個々の試料によって少しずつ異なるものの、概ね同様のレベルであった。

結論として、3 nm 厚の AuPd ではチャージアップによるシフトが顕著であるのに対し、同 6 nm ではかなり抑制されていると言える。以上より、本測定には AuPd 厚=6 nm の試料を用いた。各試料のチャージアップによるシフトについては、AuPd 中の Au4f が 83.606 eV となるように補正を行った。

(2) Ga2p スペクトル

図 4 に Ga2p の光電子スペクトルを示す。両試料とも、TOA=80° と 30° のスペクトルを重ねて表示してある。言うまでもなく、30° スペクトルの方が、試料表面側の寄与が大きい。

まず、#1 (=アニールなし) については、80° に比べ 30° の方が、わずかながら高エネルギー側に広がっているように見える。

一方、#2 (=アニールあり) では、80° に比べ 30° の方が低エネルギー側にテールを持っていることが分かる。

O₂ プラズマ処理により GaN 表面には Ga-O 結合が生成していると考えられる。また、N に比べて O の方が電気陰性度は大きいことから、Ga-N に比べて Ga-O の方が高エネルギー側に位置すると考えられる。即ち、#1 での 30° スペクトルに見られる高エネルギー側の広がり、GaN/SiN_x 界面に存在する Ga-O 結合であると考えられる。

次に、#2 のテールについて考察する。Ga-N

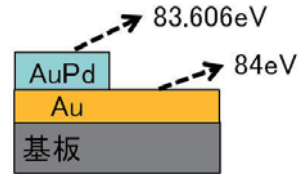


図 2. Au/AuPd 積層試料と Au4f 光電子ピーク位置

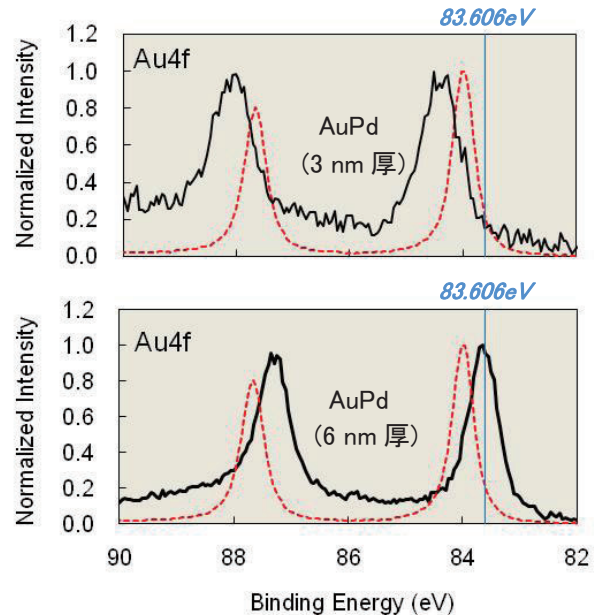


図 3. AuPd 蒸着膜の Au4f 光電子スペクトル (図中の点線は、バルクの Au 標準試料のスペクトル)

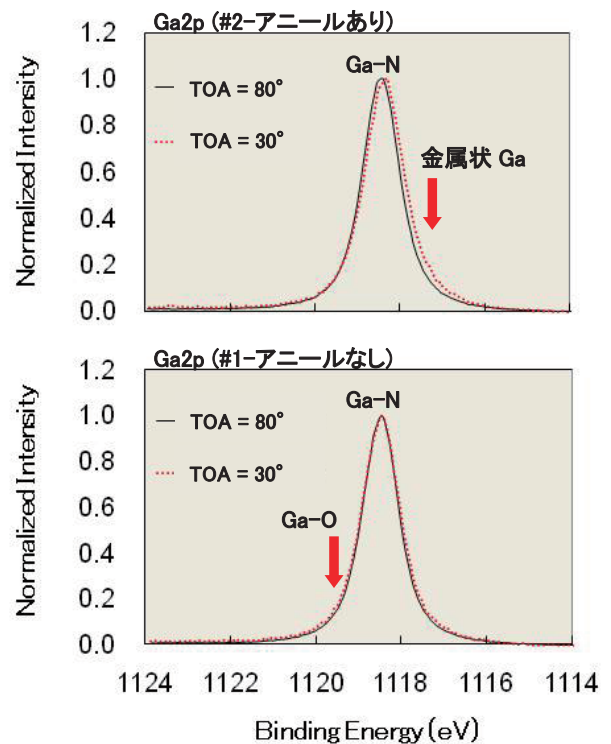


図 4. SiN 膜で被覆された GaN の Ga2p 光電子スペクトル

よりも低エネルギー側に位置する Ga の化学状態としては、金属状 Ga がある。そして、#1 (=アニールなし) には、この低エネルギー側のテールは全く見られなかった。従って、この金属状 Ga はアニールによって生成したと考えるのが妥当である(図 5 参照)。

結論として、GaN/SiN_x 界面に存在する Ga-O 結合は、アニールによる O 除去 (即ち、還元効果) によって、金属状 Ga に変化したと考えられる。

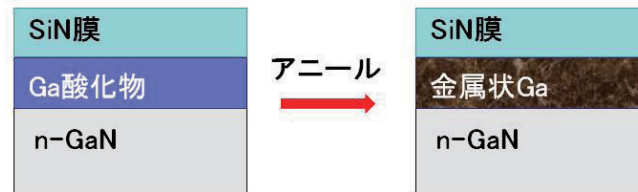


図 5. アニールによる GaN/SiN 界面の変化

今後の課題：

今回、アニール処理によって SiN_x/GaN 界面状態がどう変化するかを知見が得られた。この知見を活かして、HEMT 出力低下現象の更なる抑制を図っていく。

参考文献：

- [1] S.C. Binari, K. Ikossi, J. A. Roussos, W. Kruppa, P. Doewon, H. B. Dietrich, D. D. Koleske, A.E. Wickenden, R. L. Henry, *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**, 465 (2001).
- [2] D. J. Meyer, J. R. Flemish and J. M. Redwing. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 193505 (2008).